

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2004-004419

(43)Date of publication of application : 08.01.2004

(51)Int.Cl.

G02B 6/12

(21)Application number : 2002-207727

(71)Applicant : JAPAN SCIENCE & TECHNOLOGY
CORP

(22)Date of filing : 17.07.2002

(72)Inventor : NODA SUSUMU
OKANO MAKOTO

(30)Priority

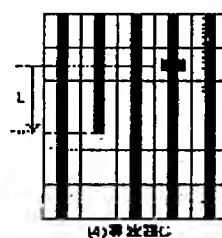
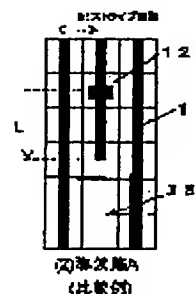
Priority number : 2002086220 Priority date : 26.03.2002 Priority country : JP

(54) THREE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL OPTICAL RESONATOR EQUIPPED WITH WAVEGUIDE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a light source in which the loss of light is reduced and which can be miniaturized.

SOLUTION: Point defect 12 is formed for three-dimensional photonic crystal constituted by laminating stripe layers where several rods 11 are arrayed in parallel. A waveguide 13 is formed by chipping a part of the rod belonging to the stripe layer to which the point defect 12 belongs and different from the rod to which the point defect 12 belongs. A positional relation between the point defect 12 and the end part of the waveguide 13 is appropriately set, so that only the resonating light of specified wavelength is taken out from the waveguide 13 at the point defect 12.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

18.07.2002

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

3648498

[Date of registration]

18.02.2005

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-4419

(P2004-4419A)

(43) 公開日 平成16年1月8日 (2004.1.8)

(51) Int. Cl.⁷

G02B 6/12

F1

G02B 6/12

Z

テーマコード (参考)

2H047

G02B 6/12

N

審査請求 有 請求項の数 17 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2002-207727 (P2002-207727)
 (22) 出願日 平成14年7月17日 (2002.7.17)
 (31) 優先権主張番号 特願2002-86220 (P2002-86220)
 (32) 優先日 平成14年3月26日 (2002.3.26)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 396020800
 科学技術振興事業団
 埼玉県川口市本町4丁目1番8号
 (74) 代理人 100095670
 弁理士 小林 良平
 (74) 代理人 100077171
 弁理士 竹内 尚恒
 (72) 発明者 野田 進
 京都府宇治市五ヶ庄 京大職員宿舎231号
 (72) 発明者 岡野 誠
 京都市左京区一乗寺東杉ノ宮町42 東杉ノ宮ハイツ303
 Fターム (参考) 2H047 KA03 LA00 RA04

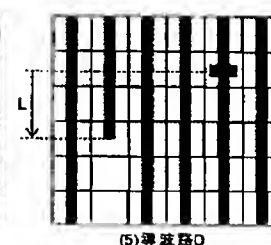
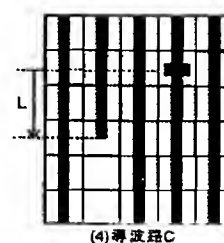
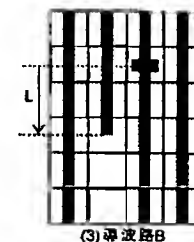
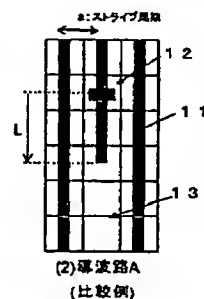
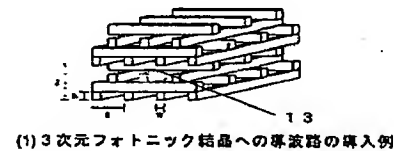
(54) 【発明の名称】 導波路を備えた3次元フォトニック結晶光共振器

(57) 【要約】

【課題】 光の損失が少なく、かつ小型化が可能な光源を提供する

【解決手段】 複数のロッド11を平行に並べたストライプ層を積層させて構成した3次元フォトニック結晶に点欠陥12を形成する。点欠陥12の属するストライプ層に属し、かつ点欠陥12の属するロッドとは異なるロッドの一部を欠損させることによって導波路13を形成する。点欠陥12と導波路13の端部との位置関係を適切に設定することにより、点欠陥12において共振する特定の波長の光だけを導波路13から取り出すことができる。

【選択図】 図4



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

a) 複数のロッドを平行且つ所定の面内周期で周期的に配置したストライプ層が複数、平行に積層されて成り、各ストライプ層に属する各ロッドが最隣接のストライプ層に属する各ロッドと直交し、各ストライプ層に属する各ロッドが2層離れたストライプ層に属する各ロッドと平行且つ上記面内周期の $1/2$ だけずれている3次元フォトリック結晶から成る本体と、

b) 上記ロッドのうちの1本に導入された点欠陥と、

c) 該点欠陥が属するストライプ層に存在する、該点欠陥ロッドとは異なるロッドの少なくとも一部に線状の欠陥を導入することによって構成される導波路と、

を備えることを特徴とする、導波路を備えた3次元フォトリック結晶光共振器。

10

【請求項 2】

該導波路が、同一ストライプ層内において該点欠陥ロッドに最隣接するロッド又は最隣接ロッドの次の隣接ロッド又はその次の隣接ロッドに設けられることを特徴とする請求項1に記載の導波路を備えた3次元フォトリック結晶光共振器。

【請求項 3】

該導波路が、同一ストライプ層内において該点欠陥ロッドに最隣接するロッド又は最隣接ロッドの次の隣接ロッドに設けられることを特徴とする請求項2に記載の導波路を備えた3次元フォトリック結晶光共振器。

【請求項 4】

該導波路が、上記点欠陥のロッド幅方向の延長線上に存在することを特徴とする請求項1～3のいずれかに記載の導波路を備えた3次元フォトリック結晶光共振器。

20

【請求項 5】

該導波路を構成する線欠陥が、該点欠陥ロッドとは異なるロッドの少なくとも一部に屈折率の異なる部分を設けることによって構成されることを特徴とする請求項1～4のいずれかに記載の導波路を備えた3次元フォトリック結晶光共振器。

【請求項 6】

導波路の上記屈折率の異なる部分が空気であることを特徴とする請求項5に記載の導波路を備えた3次元フォトリック結晶光共振器。

【請求項 7】

点欠陥ロッドが属するストライプ層の上下にそれぞれ4層以上のストライプ層を積層させることを特徴とする請求項1～6のいずれかに記載の導波路を備えた3次元フォトリック結晶光共振器。

30

【請求項 8】

点欠陥ロッドが属するストライプ層の上下にそれぞれ8層以上のストライプ層を積層させることを特徴とする請求項7に記載の導波路を備えた3次元フォトリック結晶光共振器。

【請求項 9】

a) 複数のロッドを平行且つ所定の面内周期で周期的に配置したストライプ層が複数、平行に積層されて成り、各ストライプ層に属する各ロッドが最隣接のストライプ層に属する各ロッドと直交し、各ストライプ層に属する各ロッドが2層離れたストライプ層に属する各ロッドと平行且つ上記面内周期の $1/2$ だけずれている3次元フォトリック結晶から成る本体と、

40

b) 上記ロッドのうちの1本に導入された点欠陥と、

c) 該点欠陥が属するストライプ層に存在する、該点欠陥ロッドとは異なるロッドの少なくとも一部に線状の欠陥を導入することによって構成される導波路と、

を備えることを特徴とする、3次元フォトリック結晶光メモリー。

【請求項 10】

該導波路が、同一ストライプ層内において該点欠陥ロッドに最隣接するロッド又は最隣接ロッドの次の隣接ロッド又はその次の隣接ロッドに設けられることを特徴とする請求項9に記載の3次元フォトリック結晶光メモリー。

50

【請求項 11】

該導波路が、同ーストライプ層内において該点欠陥ロッドに最隣接するロッド又は最隣接ロッドの次の隣接ロッドに設けられることを特徴とする請求項 10 に記載の 3 次元フォトニック結晶光メモリー。

【請求項 12】

該導波路を構成する線欠陥が、該点欠陥ロッドとは異なるロッドの少なくとも一部に屈折率の異なる部分を設けることによって構成されることを特徴とする請求項 9～11 のいずれかに記載の 3 次元フォトニック結晶光メモリー。

【請求項 13】

導波路の上記屈折率の異なる部分が空気であることを特徴とする請求項 12 に記載の 3 次元フォトニック結晶光メモリー。 10

【請求項 14】

該導波路を構成する線欠陥が、該点欠陥ロッドとは異なるロッドの少なくとも一部に、外部からの作用により屈折率が変化する性質を持つ材質の部材を設けることによって構成されることを特徴とする請求項 9～13 のいずれかに記載の 3 次元フォトニック結晶光メモリー。

【請求項 15】

上記部材が、量子井戸のバンドフィリング効果を有する半導体材料から成ることを特徴とする請求項 14 に記載の 3 次元フォトニック結晶光メモリー。

【請求項 16】

点欠陥ロッドが属するストライプ層の上下にそれぞれ 4 層以上のストライプ層を積層させることを特徴とする請求項 9～15 のいずれかに記載の 3 次元フォトニック結晶光メモリー。 20

【請求項 17】

点欠陥ロッドが属するストライプ層の上下にそれぞれ 8 層以上のストライプ層を積層させることを特徴とする請求項 16 に記載の 3 次元フォトニック結晶光メモリー。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、波長多重光通信装置における光源や、光の蓄積の有無によりデータの記録を行う光メモリー等に使用することが可能な光共振器に関する。 30

【0002】

近年、新しい光デバイスとして、フォトニック結晶が注目されている。フォトニック結晶とは周期屈折率分布をもった光学機能材料であり、光子のエネルギーに対してバンド構造を形成する。特に、光の伝播が不可能となるエネルギー領域（フォトニックバンドギャップ）が形成されることが特徴である。

【0003】

フォトニック結晶の適用が期待される分野の一例として、光ファイバ通信の分野を取り上げる。光ファイバ通信において、従来の光時分割多重方式（Optical Time Division Multiplexing : OTDM）に代わって、波長分割多重方式（Wavelength Division Multiplexing : WDM）が用いられている。この WDM は、一本の伝送路に複数の波長の光を伝播させ、それぞれに別個の信号を乗せる通信方式である。これによって、単位時間に送信できる情報量が飛躍的に向上する。 40

【0004】

この波長分割多重通信においては、複数の波長毎にそれぞれ光源が必要となる。現在のところ光源としては、発振波長の異なる半導体レーザを 1 波長毎に用いるものや、白色光源を光分波器と組み合わせるもの等が用いられている。しかし、これらの方法ではいずれも装置の大型化が避けられず、かつ非効率である。

【0005】

フォトニック結晶を光共振器として用い光源とすることができることは既に知られている。光共振器は光を閉じこめることができるため、適切な光の取り出し手段を設けることにより、光共振器は光源として使用可能である。そこで、フォトニック結晶を光源として用いることにより、波長分割多重通信装置の大幅な小型化を図ることができる。

【0006】

光源としてのフォトニック結晶には、2次元結晶あるいは3次元結晶を用いることができる。その両者にそれぞれ特長がある。2次元結晶は作成が比較的容易である。また、2次元結晶は3次元結晶の場合と比べて解析計算の際に行うべき計算量が少ないので、設計が比較的容易であるという利点がある。特開2001-272555号公報には2次元フォトニック結晶光共振器から構成される波長分合波器が記載されている。

10

【0007】

2次元結晶においても、面に垂直な方向には誘電体と空気との大きな屈折率の差があるので、その方向に対しても光を閉じこめることができる。しかし、3次元結晶ならば、結晶表面から離れた結晶内部に点欠陥を作れば全方向に対して光を閉じこめることができる。光の損失を少なくするという点では、光の閉じこめが重要であり、2次元結晶よりも3次元結晶の方がより望ましい。

【0008】

3次元フォトニック結晶に関しては、これまで線欠陥を導入したもの（例えば、特開2001-74955号公報）や、点欠陥を導入したもの（岡野誠他、「3次元フォトニック結晶における微小光共振器の解析」、応用物理学会2000年秋季講演概要集、同、「3次元フォトニック結晶における単一欠陥微小光共振器の解析（I I）」、応用物理学会2001年春季講演概要集）が報告されている。

20

【0009】

点欠陥を導入することによってフォトニックバンドギャップ中に欠陥準位が形成され、その欠陥準位のエネルギー値に対応した波長の光のみが点欠陥において共振する。また、線欠陥を導入することによってフォトニックバンドギャップ中に光が存在可能なエネルギー帯が形成され、そのエネルギー帯に対応する波長の光が線欠陥中を伝播することが可能になる。以上のように、点欠陥は共振器となり、線欠陥は導波路となる。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】

しかし、上記報告はいずれも点欠陥または線欠陥のいずれか1つを単独で導入したものであり、線欠陥と点欠陥の関係についてはこれまで考慮されていなかった。上記のように点欠陥と線欠陥を独立に設計し、両者を1つの3次元フォトニック結晶に導入しても、点欠陥と線欠陥の間で適切に光のやりとりをすることができなければ、点欠陥で光が共振してもそれを取り出すことができず、光源として用いることはできない。また、点欠陥と線欠陥の双方を導入した場合は、点欠陥または線欠陥が単独に存在する場合とは光の閉じこめ効率などが異なることが考えられる。以上の点を考慮すると、線欠陥と点欠陥の位置関係などの両者の相互の関係を無視して点欠陥と線欠陥を独立に設計することは不適切である。

30

【0011】

本発明はこのような課題を解決するために成されたものであり、その目的とするところは、光の損失が少なく、かつ小型化が可能な光源として使用することが可能な、導波路を備えた光共振器を提供することにある。また、同様の構成により、それを光メモリーとして利用することができることも示す。

40

【0012】

【課題を解決するための手段】

上記課題を解決するために成された本発明に係る導波路を備えた3次元フォトニック結晶光共振器は、

a) 複数のロッドを平行且つ所定の面内周期で周期的に配置したストライプ層が複数、平行に積層されて成り、各ストライプ層に属する各ロッドが最隣接のストライプ層に属する

50

各ロッドと直交し、各ストライプ層に属する各ロッドが2層離れたストライプ層に属する各ロッドと平行且つ上記面内周期の $1/2$ だけずれている3次元フォトリック結晶から成る本体と、

b) 上記ロッドのうちの1本に導入された点欠陥と、

c) 該点欠陥が属するストライプ層に存在する、該点欠陥ロッドとは異なるロッドの少なくとも一部に線状の欠陥を導入することによって構成される導波路と、

を備えることを特徴とする。

【0013】

また、本発明に係る3次元フォトリック結晶光メモリーは、

a) 複数のロッドを平行且つ所定の面内周期で周期的に配置したストライプ層が複数、平行に積層されて成り、各ストライプ層に属する各ロッドが最隣接のストライプ層に属する各ロッドと直交し、各ストライプ層に属する各ロッドが2層離れたストライプ層に属する各ロッドと平行且つ上記面内周期の $1/2$ だけずれている3次元フォトリック結晶から成る本体と、

b) 上記ロッドのうちの1本に導入された点欠陥と、

c) 該点欠陥が属するストライプ層に存在する、該点欠陥ロッドとは異なるロッドの少なくとも一部に線状の欠陥を導入することによって構成される導波路と、

を備えることを特徴とする。

【0014】

【発明の実施の形態】

(1) 導波路を備えた3次元フォトリック結晶光共振器

まず、本発明の光共振器の母体となる3次元フォトリック結晶について説明する。3次元フォトリック結晶は、棒状体であるロッドの集合で構成される。ロッドを所定の周期(面内周期) a で平行に配列することによって1枚の層が構成される。これをストライプ層と呼ぶ。ストライプ層を積層することによって3次元結晶を構成するが、フォトリックバンドギャップを形成するためには、各ストライプ層に属する各ロッドと他のストライプ層に属するロッドとの間の位置関係が重要である。本発明で用いる3次元フォトリック結晶においては、各ストライプ層に属する各ロッドが最隣接のストライプ層に属する各ロッドと直交するように配置される。また、各ストライプ層に属する各ロッドが、最隣接のストライプ層の次に近いストライプ層(すなわち、2層離れたストライプ層)に属する各ロッドと平行、且つロッドの幅方向に長さ $a/2$ だけずれて配置されることによって周期的な屈折率分布を形成する。このような周期的な屈折率分布により、3次元フォトリック結晶内に、光が存在し得ないエネルギーの範囲(フォトリックバンドギャップ)が形成される。

【0015】

このような周期性を有する3次元フォトリック結晶内の1本のロッドに、点欠陥を導入する。点欠陥としては、単にロッドの一部を欠損させただけのものや、そこにロッドとは異なる屈折率を有する物体を配置したもの、或いはその点におけるロッドの形状を変化させたもの等が考えられる。これらを総称して(ロッドの一部を欠損させただけのものも含め)欠陥部材と呼ぶ。こうして導入された点欠陥により3次元フォトリック結晶内における周期的な屈折率分布に乱れが生じ、フォトリックバンドギャップ内に、光が存在し得るエネルギー準位(欠陥準位)が形成される。すなわち、このような点欠陥を有する3次元フォトリック結晶は、光共振器となる。なお、点欠陥を光源として使用することを考えた場合、欠陥部に発光体を導入する必要があるが、この場合には発光体自体を欠陥部材としてもよい。

【0016】

上記点欠陥ロッドが属する(すなわち、点欠陥が属する)ストライプ層内の、点欠陥ロッドとは別のロッドの少なくとも一部に線状の欠陥を設けることにより、導波路を形成する。この線状の欠陥(線欠陥)としては、上記点欠陥と同様に、その部分のロッドを欠損させたものや、そこにロッドとは異なる屈折率を有するロッドを配置したもの、或いは、ロッドの形状を変化させたもの(例えば、太く/細くしたり、断面形状を変化させたもの)

等が考えられる。ロッドを欠損させるという方法は、導波路のその部分の屈折率を空気の屈折率に変えるということであるが、これにより、一般的にロッドとの屈折率の差を最も大きくとることができるので、好ましい。

【0017】

上記点欠陥とこの線欠陥が近接している場合、両者の間に相互作用が生じ、両者間で光の流出入が生じる。すなわち、点欠陥で共振する光を線欠陥から取り出すことができる。この構成により、点欠陥を有する光共振器は光源として用いることができる。後に詳しく述べるように、同一ストライプ層内で点欠陥ロッドに最隣接するロッド、又はその次の隣接ロッドに導波路を設けた場合に、最も点欠陥と線欠陥（導波路）の間の光の流出入が生じやすくなる。点欠陥ロッド（点欠陥）と導波路ロッドとの間の距離が大きくなるにつれて、光の流出入が生じ難くなる。

【0018】

点欠陥と導波路の間の光の流出入の様子は、両者の位置関係によって大きく異なる。導波路の端部の位置によっては、点欠陥のロッドの幅方向の延長線上（真横）に導波路が存在する場合もあるし、存在しない場合もある。傾向としては、点欠陥のロッド幅方向の延長線上（真横）に導波路が存在する場合は、光の流出入が生じやすい。一方、点欠陥のロッド幅方向の延長線上（真横）に導波路が存在しない場合は、導波路の端部と点欠陥との距離が遠くなるにつれて光の流出入が生じ難くなる。ただし、そのような傾向は一様ではなく、後述するように、各種条件により複雑に変化するため、実際の光源としての光共振器及び導波路の設計に当たっては、後述の方法に従って計算を行う必要がある。

【0019】

なお、線欠陥（導波路）を、点欠陥ロッドに形成した場合、それは導波路としての役割を果たさない。すなわち、点欠陥で共振した光は線欠陥には全く流出入しない。その理由は、点欠陥と線欠陥がこのような位置関係にある場合に、点欠陥における電磁波と線欠陥における電磁波との偶奇が逆になり、両者が電磁的に結合しないためであると考えられる。

【0020】

ここまでは線欠陥と点欠陥の間の光の流出入について述べたが、光共振器としては、点欠陥から外部への光の流出は少ないほうがよい。ここで、「外部への光の流出」とは、導波路を通じた光の流出と、それ以外の、3次元フォトニック結晶内への光の流出（損失）の和を指す。点欠陥が属するストライプ層の上下に積層するストライプ層の総数が少ないほど、導波路以外からの光の流出が大きくなる。導波路以外からの光の流出が大きすぎると点欠陥において光を共振させることができなくなる。これを防ぐためには、点欠陥が属するストライプ層の上下にそれぞれ4層以上積層させればよい。また、点欠陥内で光を共振させてレーザー発光を得るための目安として、点欠陥内に蓄えられた光のエネルギーを、単位時間に外部へ流出した光のエネルギーで除し、共振角周波数を乗じた値で定義される系全体のQ値が1000以上であることが望ましい。後述のように、そのためには、点欠陥が属するストライプ層の上下にそれぞれ8層以上積層させればよい。

【0021】

（2）3次元フォトニック結晶光メモリー

後述するように、本発明に係る導波路を備えた3次元フォトニック結晶光共振器は、導波路の端部と点欠陥との、ロッドの長手方向の距離Lについて次のような特徴を持つ。点欠陥と導波路の間のQ値を表すQwg値について、特定の距離 $L=L_0$ におけるQwg値が、それとはわずかに異なる距離 $L_0+\delta L_0$ （ δL_0 は正負いずれの値も取り得る）におけるQwg値と数桁大きくなる。これを利用すると、以下に述べるように、上記構成の3次元フォトニック結晶を光メモリーとして用いることができる。

【0022】

Qwg値が低い場合は点欠陥と導波路との間で光の流出入が生じやすい。一方、Qwg値が高い場合は点欠陥と導波路との間で光の流出入が生じにくく、点欠陥に光が保持されやすい。本発明の光メモリーにおいては、距離 $L_0+\delta L_0$ におけるQwg値が、光の流出入をほとんど生じさせない値にすることができる。そこで、距離Lを可変にする手段を設

10

20

30

40

50

けることによって光メモリーを構成する。この光メモリーは以下のように動作する。

【0023】

まず、距離 L を $L_0 + \delta L_0$ とする。この時、導波路を通じて外部から点欠陥に光が流入する。次に上記距離 L を可変にする手段を用いて距離 L を L_0 にする。これによって導波路と点欠陥の間の光の流出入がほとんど生じなくなり、上記流入した光が点欠陥において保持される。これは、光メモリーである。この光メモリーから光を取り出すときは、上記距離 L を可変にする手段を用いて距離 L を $L_0 + \delta L_0$ にする。これによって、点欠陥に保持されていた光が導波路を通じて外部へ流出する。

【0024】

上記距離 L を可変にする手段には様々なものが考えられるが、例えば導波路を構成する線欠陥ロッドを動かす方法がある。また、次のような構成を考えることもできる。ロッドの一部を、外部からの作用により屈折率が変化する材質の棒材で置き換えることにより導波路を形成する。例えば、InGaAsP系やInGaAlAsP系等の半導体において、量子井戸のバンドフィリング効果によって、レーザを照射することにより電荷密度が変化し、屈折率が変化する物質を作製することができる。このような物質を材質とする導波路に照射するレーザの照射範囲を制御することにより、 L の大きさを変化させることができる。

【0025】

【発明の効果】

本発明に係る導波路を備えた3次元フォトリック結晶光共振器により、3次元フォトリック結晶に導入した点欠陥において共振する光を取り出すことができる導波路を形成することが可能になった。これによって3次元フォトリック結晶を特定の波長の光源として用いることができるようになった。上記光源は1個の結晶で構成されるため、装置の小型化に寄与する。このような点欠陥とそれに結合する導波路を1個の3次元フォトリック結晶デバイス内に複数組設けることにより、複数波長の光の小型光源を構成することも可能である。また、本発明に係るフォトリック結晶は3次元系であるので、点欠陥から導波路以外への光の流出入は少なく、光の保持効率がよい。

【0026】

本発明に係る3次元フォトリック結晶光メモリーでは、3次元フォトリック結晶に導入した点欠陥に光を保持し、その光を任意に出し入れすることができる。上記光共振器と同様に、光の保持効率がよく、装置の小型化に寄与するという、3次元フォトリック結晶特有の利点を持つ。

【0027】

【実施例】

(1) 一実施例の構成例

まず、母体となる3次元フォトリック結晶の構成例を図1に示す。図に棒状に示したものがロッド11である。図の右端に記した矢印の1つがストライプ層1層分に対応する。図中の a は面内でのロッド配列の周期（面内周期）の長さ、 z はストライプ層の積層周期（面外周期）の長さ、 w は面内方向のロッド11の幅、 h はロッド11の高さをそれぞれ表す。

【0028】

図1のような結晶がフォトリックバンドギャップを持つことを確認するために、平面波展開法を用いてエネルギーバンドを計算した結果を図2に示す。ここで面内周期 a に対する面外周期 z の比（面内外周期比） $z/a = 1$ 、2、面内周期 a に対するロッドの幅 w の比（充填率） $w/a = 0.25$ 、ロッドの屈折率を3.309とした。図2の左側の縦軸は、光の周波数を c/a （ c は光速）で除した規格化周波数を表し、右側の縦軸はフォトリックバンドギャップの中心エネルギーを0.8 eV（光多重通信において一般的に用いられる波長1.55 μm の光のエネルギー）とした場合の光子エネルギーを表す。図2の横軸は、波数空間における方向を表す。この図から、規格化周波数が0.38～0.45の範囲で、波数空間の全方向に対してエネルギーギャップが開いていることが分かる。これ

10

20

30

40

50

がフォトニックバンドギャップである。

【0029】

上記母体の結晶内の1本のロッドに、図3に示すように点欠陥12を導入する。図3の右図は、点欠陥12が属するストライプ層のみを表したものである。本実施例においては、点欠陥12はロッドと同じ高さを有する直方体であり、その材質はロッドと同じである、とした。なお、材質（屈折率）をロッドとは異なるとした場合も、以下に示す結果は同様となる。この直方体の、ロッドの幅方向（以下、x方向とする）の長さ Δx とロッドの長手方向（y方向）の長さ Δy の比 $\Delta x / \Delta y$ を本実施例では2としたが、他の値をとることもできる。

【0030】

図4（1）に、3次元フォトニック結晶への導波路の導入例を斜視図で示す。点欠陥を設けた3次元フォトニック結晶に、図4のようにロッドの一部を欠損させることによって導波路13を導入する。すなわち、本実施例では線欠陥は空気で構成されている。

【0031】

図4（2）～（5）に、点欠陥12と導波路13の種々の関係を示す。図4（2）～（5）では点欠陥12及び導波路13が存在するストライプ層のみを示した。このうち、（2）に比較例として示した導波路Aは、点欠陥12が属するロッドに導波路を設けたものである。（3）～（5）に示した導波路B、C、Dが本発明の導波路の実施例である。導波路B、C、Dは順に、点欠陥ロッドからx方向に1周期、2周期、3周期離れたロッドの一部を欠損させることにより設けられる。いずれも、ロッド11が存在しない部分が導波路13である。

【0032】

導波路13の端部と点欠陥12とのy方向の距離をLで表す。本発明の導波路の構成においては、距離Lは負の値を取ることもできる。図5に距離Lが負の場合の導波路の構成例を示す。

【0033】

（2）点欠陥から導波路への光の流出入の計算

時間領域差分法を用いて、点欠陥から導波路への光の流出入を計算した。時間領域差分法は、離散化した時間に対して、マクスウェル方程式のうちの時間に依存する回転方程式を解くものである。ここでは、上記光の流出入を示す値として、点欠陥と導波路の間のQ値である Q_{wg} を用いた。 Q_{wg} 値は点欠陥に蓄えられているエネルギーを、単位時間当たりに点欠陥から導波路へ漏れ出す光のエネルギーで除し、点欠陥で共振する光の角周波数を乗じたものである。本計算においては、積層方向への光の漏れ出しを防ぐために、点欠陥が属するストライプ層の上下にはそれぞれ17層ずつストライプ層が存在するものとした。

【0034】

（2-1）導波路Aの場合（比較例）

導波路Aの場合、距離Lがいずれの値のときも Q_{wg} 値が、導波路を導入せず点欠陥のみを導入した場合について外部との結合を示すQ値とほぼ同じになった。導波路Aは導波路としての役割を全く果たしていないと言える。図6に、導波路Aを用いた場合の電磁界分布の計算結果の一例（ $L = 2.00a$ の場合）を示す。図中の影で表される部分に光が分布する。光が点欠陥の位置に強く局在し、導波路とは全く結合していないことが分かる。

【0035】

図7（a）に点欠陥及び導波路における電磁界分布を示す。ここで、図（a）中に正と記された部分と負と記された部分では、電界及び磁界それぞれのz方向の正負が異なる。図（a）中に示した鏡映面 σ （x軸に垂直）に対する、点欠陥及び導波路それぞれの電場及び磁場の偶奇性を図7（b）に示す。電場、磁場いずれも全方向において、点欠陥と導波路では偶奇が異なる。これによって、導波路Aの場合には、電磁界モードの対称性により、点欠陥と導波路は結合しない。

【0036】

10

20

30

40

50

(2-2) 導波路 B、C、D の場合 (本発明)

導波路 B、C、D のそれぞれについて、 Qwg 値の距離 L 依存性を計算した結果を図 8 ~ 10 に示す。特定の距離 L において高い Qwg 値をとる場合があるが、全体的に見れば、導波路 B、C、D の Qwg 値は導波路 A の Qwg 値よりも小さくなった。点欠陥と外部との間の Q 値よりも Qwg 値の方が小さければ導波路の役割を果たす。積層数を大きくすれば Q 値を大きくすることができるが、製造上の観点から積層数を大きくすることは難しいので、 Q 値は数万のオーダー以下となる。よって、 Qwg 値はおおむね 10000 以下、望ましくは 5000 以下である必要がある。導波路 B 及び C の場合、距離 L を適切な値にすることで Qwg 値が 10000 以下になる。導波路 D の場合も距離 L の大きさによっては Qwg 値が 10000 以下になる。しかし、導波路の属するロッド (線欠陥ロッド) が点欠陥ロッドから x 方向に 4 周期以上離れた場合は上記条件を満たさない。よって、導波路として望ましい形態は、点欠陥ロッドが導波路の属するロッドと 1 ~ 3 本離れている場合、さらに望ましいのは、1 ~ 2 本離れている場合である。

【0037】

上記導波路 B、C、D のように、点欠陥ロッドと導波路の属するロッドをずらすことによって非対称性を導入すると、点欠陥の鏡映面と導波路の鏡映面が一致しなくなる。これによって、導波路 A の場合には結合しなかった点欠陥と導波路が、導波路 B、C、D では結合するようになる。

【0038】

ここまでは各導波路について導波路が属するロッドと点欠陥ロッドとの距離の変化による Qwg 値の変化を述べた。しかし、これら 2 本のロッド間の x 方向の距離が同じでも、点欠陥と導波路端部の間の y 方向の距離 L の値が異なれば Qwg 値は大きく異なる。まず、距離 L 依存性の傾向を見れば、(i) 距離 L が負のときの方が、距離 L が正のときよりも Qwg 値は小さい、(ii) 距離 L が正のときは、距離 L が小さいほど Qwg 値は小さい、と言える。

【0039】

この 2 つの特徴は、導波路と点欠陥の間の距離を考慮すれば理解することができる。距離 L が負の時は x 方向について導波路が点欠陥のロッド幅方向の延長線上に達しているので、距離 L がいずれの値のときも点欠陥と導波路との距離は、導波路の属するロッドと点欠陥ロッドの距離である。それに対して、距離 L が正の時は導波路が点欠陥のロッド幅方向の延長線上に達していないので、点欠陥と導波路との距離は導波路の属するロッドと点欠陥ロッドの距離よりも長くなり、かつ距離 L の増加とともに点欠陥と導波路本体との直線距離も長くなる。以上より、傾向としては、導波路と点欠陥との距離が長くなると Qwg 値が大きくなると考えることができる。

【0040】

距離 L 依存性の傾向は上記のように理解できるが、図 8 ~ 10 のグラフ上で、特定の距離 L において Qwg 値が突出して大きくなっている。この現象は L について周期性を持つように見られる。これは電磁波の波面と導波路の端部との位置関係によると考えられる。実用上はこの Qwg 値が突出して大きくなるときの距離 L を避けて導波路を設計するように留意しなければならない。

【0041】

図 8 (導波路 B) において、特定の距離 L に対して Qwg 値を得ることができなかった。これは、導波路と点欠陥との結合が極端に強く、点欠陥に光が蓄積されないためである。

【0042】

図 11 に導波路 C を用いた場合の電磁界分布を、いくつかの距離 L に対して計算した結果を示す。 Qwg が 5000 以下である (1), (2) は、点欠陥で共振する光が導波路に流出している様子を示している。(4) は図 9 において Qwg がピークを示す場合に当たり、光が導波路にはほとんど流出せず、点欠陥に強く局在している。

【0043】

図 11 は距離 L が正の場合を示した。 L が負の場合は前記のように Qwg は小さくなる傾

10

20

30

40

50

向があるが、それでも特定の距離 L において Qwg が大きくなる。そのような場合の電磁界分布の一例を図12に示す。点欠陥のみならず導波路の端部でも光が強く局在していることが分かる。点欠陥から導波路へは光が流出しているが、導波路端部での光の局在によって、導波路から外部へは光を取り出すことはできない。

【0044】

図13に、導波路Bにおいて Qwg 値を得ることができなかった場合の電磁界分布の一例を示す。点欠陥においてほとんど光が共振していないことがわかる。

【0045】

上に述べた図11(4)、図12及び図13は、導波路の導入について望ましくない例を示しているが、 L を適切に選択することによっていずれも回避することができる。実際に導波路の設計をする際には、点欠陥ロッドとは異なるロッド、好ましくは点欠陥ロッドから1~2本離れたロッドを欠損させることを基本とし、その中で適切な距離 L を選択すればよい。

【0046】

(3) 系全体の Q 値の積層数依存性

上記計算では、ストライプ層の積層数は十分多く、導波路以外への点欠陥からの光の流出は無いと仮定した。そこで、前記系全体の Q 値の積層数依存性を計算し、導波路以外への光の流出の影響を調べた。計算は、 $L = 1.75a$ の導波路Cを有し、点欠陥が属するストライプ層の上下それぞれに6~14層が積層する場合について行った。その結果を図14に示す。

【0047】

図14の左から2番目の欄が本計算結果である。点欠陥が属するストライプ層の上下それぞれに8層以上積層させれば、点欠陥内で光が共振してレーザー発光が得られる目安である1000以上の Q 値が得られる。

【0048】

(4) 光メモリーへの応用

図8~10では、距離 L のわずかな違いによって Qwg 値が数桁異なることが分かる。例えば図8において $L = 0.0a$ のときの Qwg 値が約200であるのに対して、 $L = 0.25a$ のとき、すなわち L がストライプ周期の $1/4$ だけ異なるときは Qwg 値が約500000になる。これは実用上、次のように利用することができる。 $L = 0.0a$ で導波路から光を点欠陥に流入させた後、 L を $L = 0.25a$ に変化させる。これにより、点欠陥に流入した光は導波路にはほとんど流出せず、光が点欠陥に局在したままとなる(保持される)。そして、再び L を $L = 0.0a$ に変化させれば、点欠陥に保持されていた光が導波路に流出する。これは、光を点欠陥に貯めることができ、それを再び取り出すこともできることを意味する。

【0049】

なお、 L の値はここで例として挙げた $L = 0.0a$ 及び $L = 0.25a$ に限らず、一方を低い Qwg を持つ L 値、他方を高い Qwg を持つ L 値とすれば、どのような値の組み合わせでもよい。また、導波路の構成も上で例に挙げた導波路Bに限らず、点欠陥の属するストライプ層に属し、かつ点欠陥の属するロッドとは異なるロッドの少なくとも一部を欠損させた導波路ならばよい。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の導波路を備えた光共振器の母体となる、3次元フォトニック結晶の構成例。

【図2】母体の3次元フォトニック結晶のフォトニックバンド構造を表すグラフ。

【図3】母体の3次元フォトニック結晶への点欠陥の導入例を表す図。

【図4】点欠陥を設けた3次元フォトニック結晶への導波路の導入例を表す図。

【図5】距離 L が負である導波路の導入例を表す図。

【図6】導波路Aを用いた場合の電磁界分布を表す図。

【図7】導波路Aを用いた場合の電磁界モードの偶奇を表す図及び表。

10

20

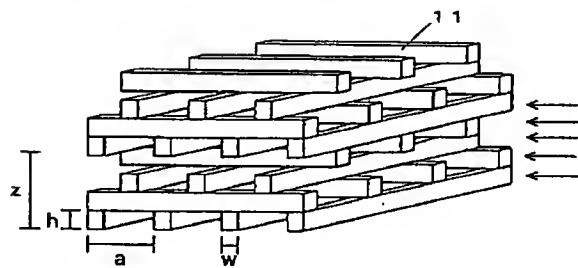
30

40

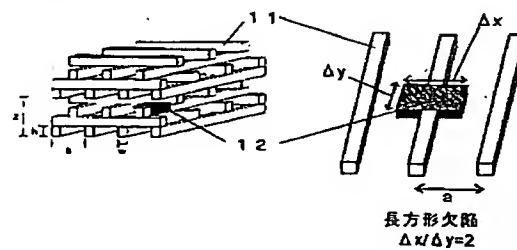
50

- 【図 8】導波路 B を用いた場合の Qwg 値の距離 L 依存性を表すグラフ。
 【図 9】導波路 C を用いた場合の Qwg 値の距離 L 依存性を表すグラフ。
 【図 10】導波路 D を用いた場合の Qwg 値の距離 L 依存性を表すグラフ。
 【図 11】導波路 C を用いた場合の電磁界分布を表す図。
 【図 12】距離 L が負の値のとき、 Qwg が大きくなる場合の電磁界分布を表す図。
 【図 13】導波路 B において Qwg 値を得ることができなかった場合の電磁界分布の一例を表す図。
 【図 14】系全体の Q 値の積層数依存性を表す表。
 【符号の説明】
 1 1 … ロッド
 1 2 … 点欠陥
 1 3 … 導波路

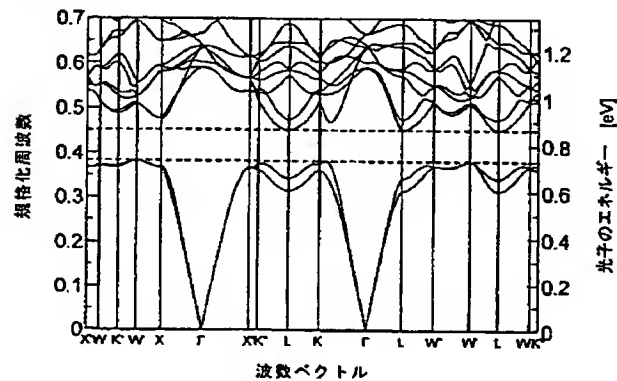
【図 1】



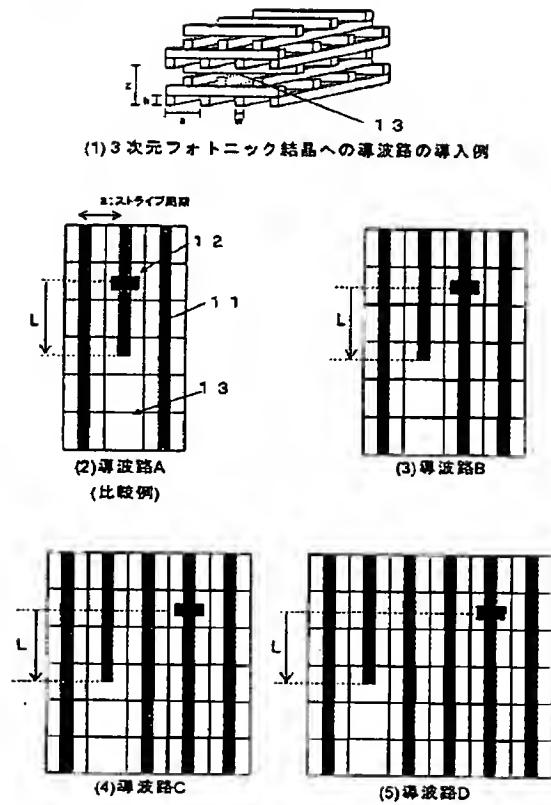
【図 3】



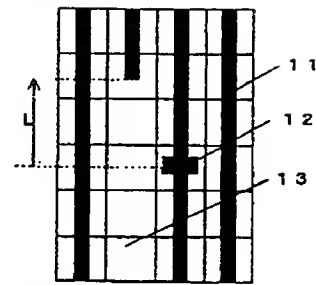
【図 2】



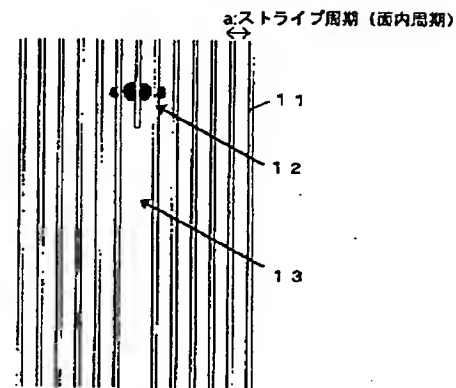
【図 4】



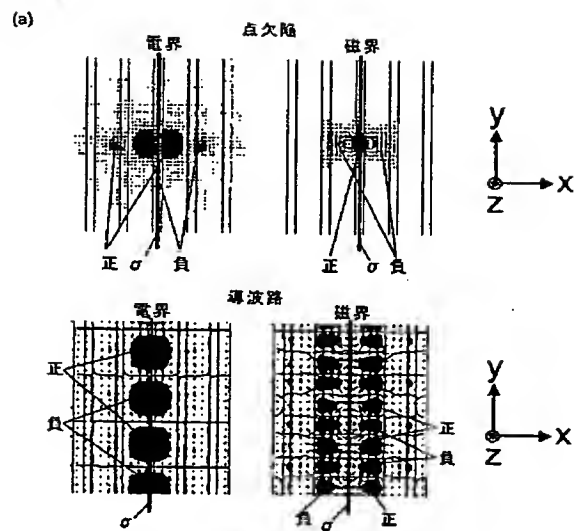
【図 5】



【図 6】



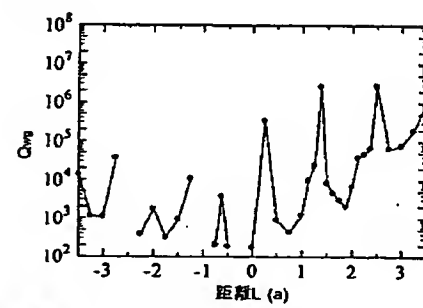
【図 7】



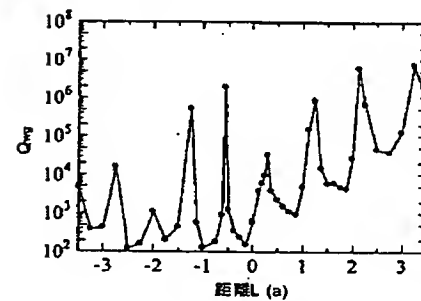
(b)

	欠陥モード	導波路モード
E_x	偶	奇
E_y	奇	偶
E_z	奇	偶
H_x	奇	偶
H_y	偶	奇
H_z	偶	奇

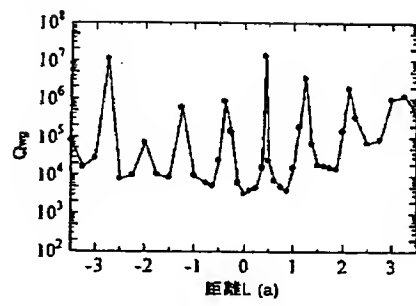
【図 8】



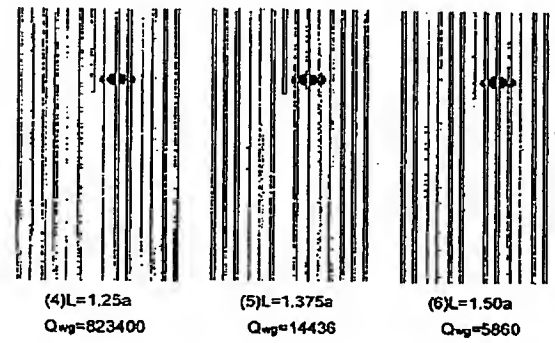
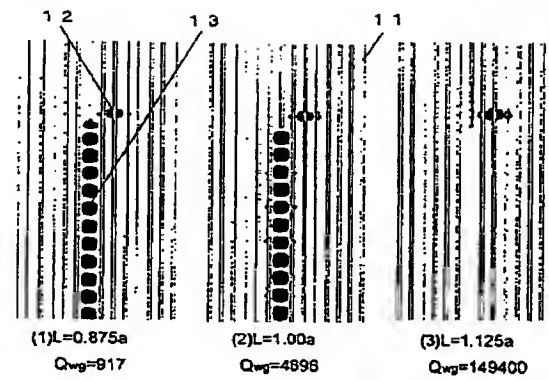
【図 9】



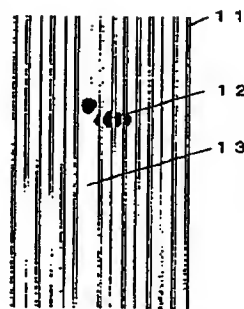
【図 10】



【図 11】



【図 12】



【図 14】

z 方向積層数	Q 値
13 層(6+1+6 構造)	742.4
17 層(8+1+8 構造)	2,551
21 層(10+1+10 構造)	4,086
25 層(12+1+12 構造)	4,607
29 層(14+1+14 構造)	4,713

【図 13】

